

Jiří ŠČUČKA¹, Eva HRUBEŠOVÁ², Petr MARTINEC³, Tomáš PETŘÍK⁴

**PÍSEK INJEKTOVANÝ POLYURETANEM - ANALÝZA NAPĚŤO-DEFORMAČNÍHO STAVU
GEOKOMPOZITNÍHO MATERIÁLU S ANOMÁLNÍ STRUKTUROU**

**POLYURETHANE-GROUTED SAND - ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF
GEOCOMPOSITE MATERIAL WITH ANOMALOUS STRUCTURE**

Abstrakt

Při tlakové injektáži napěňující polyuretanové pryskyřice do prostředí písčitých nebo písčito-štěrkovitých zemin může docházet ke vzniku materiálu s plastickou konzistencí v blízkém okolí injektážní trubky. V příspěvku je tato nežádoucí strukturní anomálie popsána na příkladu geokompozitního tělesa vzniklého při realizaci konkrétního geotechnického projektu a je provedena modelová analýza napěťo-deformačního stavu takto ovlivněného materiálu.

Klíčová slova

Polyuretan, písek, injektáž, plastická konzistence, strukturní anomálie, napěťo-deformační stav.

Abstract

Material of plastic consistency can be created around the grouting pipe when a foaming polyurethane resin is grouted into sands or sandy gravels. This undesirable structural anomaly is described in the paper on an example of geocomposite material formed during realization of particular geotechnical project. Model analysis of stress-strain state of material affected in this way is also provided.

Keywords

Polyurethane, sand, grouting, plastic consistency, structural anomaly, stress-strain state.

1 ÚVOD

Tvar, struktura a vlastnosti geokompozitních těles, vznikajících tlakovou injektáží chemických hmot do písčitých nebo písčito-štěrkovitých zemin, jsou ovlivněny řadou faktorů [1,2,3]. Primární vliv mají vlastnosti neopolymerovaného injektážního média (především jeho viskozita v závislosti na

¹ Doc. Ing. Jiří Ščučka, Ph.D., Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 596 979 334, e-mail: jiri.scucka@vsb.cz.

² Doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D., Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 373, e-mail: eva.hrubesova@vsb.cz.

³ Prof. Ing. Petr Martinec, CSc., Oddělení laboratorního výzkumu geomateriálů, Ústav geoniky AV ČR, v.v.i. Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, Ostrava, Studentská 1768, 708 00 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 596 979 331, e-mail: petr.martinec@ugn.cas.cz.

⁴ Ing. Tomáš Petřík, Katedra geotechniky a podzemního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 362, e-mail: tomas.petrik@vsb.cz.

teplotě a reologii tuhnutí), parametry injektáže (injektažní tlak, rychlost a doba vtláčení, množství pojiva a kvalita směšování vstupních komponent) a vlastnosti injektovaného zeminového prostředí (složení zemin, tvar a velikost částic, mezerovitost, vrstevnatost, propustnost, vlhkost, proudění vody, teplota prostředí a další).

Vlivem charakteru zeminového prostředí na morfologii vznikajících injektažních těles se zabýval např. Karol [3], který na základě laboratorních experimentů popsal základní formy injektažních těles vznikajících chemickou injektáží homogenního a vrstevnatého zeminového prostředí s různou propustností. Karol [3] se zabýval také vlivem vlhkosti a proudění podzemní vody na morfologii těles vznikajících použitím různých typů chemických injektažních hmot. Aldorf a Vymazal [4] popsali zonální heterogenitu stavby těles, vzniklých PUR injektáží v málo propustných pískách, Ščučka [5] vypracoval metodiku pro vizualizaci a kvantifikaci stavby injektovaných písků a popsal změny charakteru pórů a stupně napěnění PUR pojiva v kompozitu v závislosti na vzdálenosti od injektažní trubky.

Při injektáži pěnicí polyuretanové pryskyřice do písčitého prostředí může docházet k významné strukturní anomálii ve vzniklém kompozitním tělese, která se projevuje plasticitou konzistencí materiálu v blízkém okolí injektažní trubky (obecně v okolí vstupu injektažního média do zeminového masivu). Tento jev je údajně v geotechnické praxi znám; v odborné literatuře však dosud nebyl publikován a nebyly vysvětleny příčiny jeho vzniku.

V tomto příspěvku je zmíněný jev popsán na příkladu geokompozitního tělesa získaného při realizaci konkrétního geotechnického projektu a je provedena modelová analýza napětí-o-deformačního stavu takto ovlivněného materiálu v podmínkách in situ.

2 MATERIÁL INJEKTOVANÉHO TĚLESA

Byla provedena analýza monolitického geokompozitního tělesa elipsoidního tvaru o celkové délce 74 cm a maximální šířce 32 cm (obr. 1a). Těleso kompozitu vzniklo tlakovou injektáží dvousložkové polyuretanové pryskyřice do písků a břidlicových písčitých brekcií při ražbě kolektoru pro inženýrské sítě. V části raženého díla byla bezpečnost ražby zajištěna vytvořením ochranného deštníku nad budoucím výrubem pomocí tlakové chemické injektáže přes zarážené perforované ocelové trubky. Těleso kompozitu pro analýzu bylo vyjmuto z masivu bez poškození i s částí ocelové injektažní trubky, procházející tělesem v celé jeho délce. Hmotnost tělesa včetně injektažní trubky byla 60 kg.

Kompozitní materiál tělesa byl podrobně analyzován, klasifikován a kvantifikován z hlediska strukturně-texturních parametrů a byl podroben laboratorním zkouškám pevnostních a přetvárných vlastností [5]. Významným zjištěním je především anomálie v konzistenci materiálu v blízkém okolí injektažní trubky. V okrajových partiích tělesa převládá tuhý materiál s voštinovou texturou typu I. [6], kdy částice zeminy jsou hojně obklopeny pojivem, které je k povrchu částic dobře přilnuto (obr. 2a). Pevnost v prostém tlaku kompozitu dosahuje v průměru 22 MPa (min. 14 MPa, max. 28,4 MPa). V okolí injektažní trubky však materiál vykazuje kombinaci pórové textury a povlakové struktury [6], kdy malé množství nezpěněné pojivové hmoty tvoří povlaky kolem zeminových zrn (obr. 2b). Materiál má v těchto partiích měkkou, tvárnou konzistenci a pevnost v tlaku dosahuje v průměru pouze 3 MPa (min. 1,5 MPa, max. 3,6 MPa). Ovlivněná oblast je makroskopicky patrná z příčného řezu geokompozitním tělesem na obr. 1b.

Autoři předpokládali, že měkká konzistence materiálu je způsobena nedostatečnou polymerací polyuretanového pojiva, buď z důvodu nekvalitního promísení vstupních složek injektažní hmoty, nebo vlivem tlakových podmínek během injektáže. Vzorky materiálu byly proto analyzovány metodami FTIR spektroskopie a termické analýzy a detailní struktura materiálu byla zobrazena skenovací elektronovou mikroskopií (SEM). Srovnání získaných infračervených spekter s referenčními spektry polyuretanu však prokázalo, že pojivo v kompozitu je shodně polymerované. Mikroskopická analýza následně ukázala, že plastická konzistence je způsobena samotným specifickým strukturně-texturním charakterem materiálu v postižených partiích tělesa.

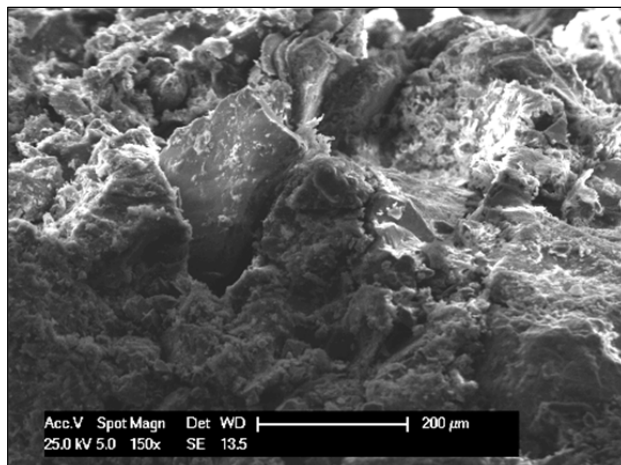


a)

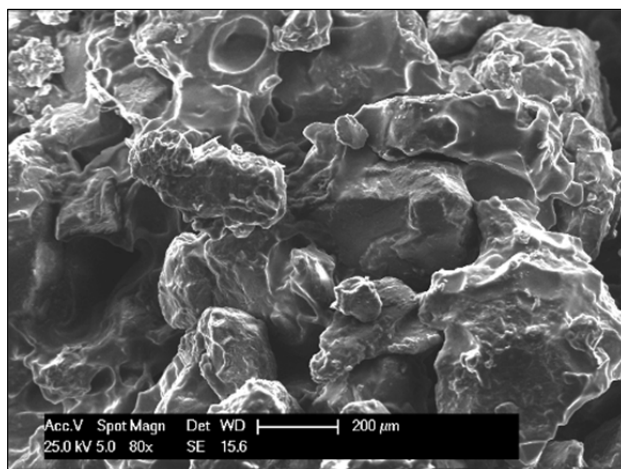


b)

Obr. 1: Analyzované geokompozitní těleso: a) těleso odkopané z masivu po provedení tlakové injektáže, b) příčný řez tělesem s vyznačenou makroskopicky patrnou anomální oblastí (tmavší, hnědě zbarvené partie) v okolí injektážní trubky



a)



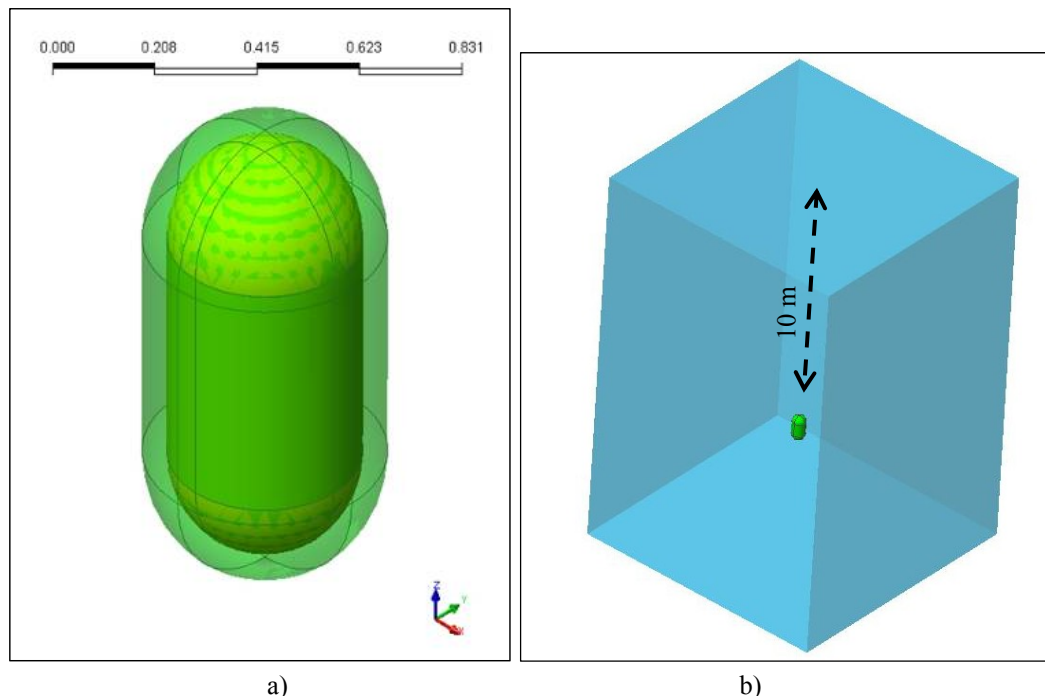
b)

Obr. 2: Mikroskopická stavba geokompozitu: a) voštinová textura tuhého materiálu v okrajových partiích tělesa s částicemi písku hojně obklopenými pojivem, které je k povrchu částic dobře přilnuto, b) anomální stavba materiálu v okolí injektážní trubky s pórovou texturou, povlakovou strukturou a měkkou tvárnou konzistencí

3 ANALÝZA NAPĚŤO-DEFORMAČNÍHO STAVU INJEKTOVANÉHO TĚLESA

Pro posouzení rozdílů mezi anomálním geokompozitním tělesem s plastickým jádrem a "zdravým" geokompozitem s homogenní stavbou, byla provedena analýza napětí-deformačního stavu injektovaného tělesa. Bylo použito softwaru MIDAS GTS, založeného na metodě konečných prvků. Bylo uvažováno oválné těleso o poloměru 25 cm a délce 1 m, uložené v hloubce 10 m. Modelově bylo analyzováno jednak referenční homogenní těleso tvořené tuhým, pevným, soudržným geokompozitem (geokompozit A) a jednak nehomogenní těleso, jehož vnitřní jádro je tvořeno měkkým kompozitem s tvárnou konzistencí (geokompozit B) a vnější obal tloušťky 5 cm je pak tvořen geokompozitem A (obr. 3a). Uložení injektovaných těles bylo uvažováno v hloubce 10 m v pískovém masívu, a to rovněž variantně – horizontálně a vertikálně. Obr. 3b ukazuje základní geometrické schéma modelu při vertikálním uložení tělesa v modelovém kvádru výšky 15 m s podstavou 10×14 m.

V prostředí programového systému Midas GTS byl vytvořen model z 14760 čtyřstěnových prostorových konečných prvků. Byl uvažován Mohr-Coulombův konstitutivní model. Vstupní charakteristiky materiálů v modelu jsou uvedeny v tabulce 1. Střední hodnoty pevnosti v tlaku a modulu přetvárnosti byly stanoveny experimentálně v laboratorním mechanickém lisu na krychlových a válcových zkušebních tělesech, připravených z kompozitu řezáním a jádrovým vrtáním. Poissonovo číslo bylo stanoveno odborným odhadem. Pro účely modelování byly odvozeny hodnoty pevnosti v tahu jako 1/10 tlakové pevnosti a následně určeny charakteristiky Mohrovy obalové čáry.



Obr. 3: Vertikálně uložené modelové nehomogenní injektované těleso (a) a základní geometrické schéma modelu při vertikálním uložení tělesa (b)

Tab. 1: Vstupní charakteristiky materiálů v modelu

	Objemová tíha [kN/m ³]	Modul přetvárnosti [MPa]	Poissonovo číslo [-]	Pevnost v tlaku [MPa]	Soudržnost [kPa]	Úhel vnitřního tření [°]
geokompozit A (homogenní, pevný)	17,54	1500	0,4	22	3478	55
geokompozit B (heterogenní s tvárným jádrem)	18,87	300	0,3	3	476	55
písek	20	50	0,28	-	0,1	37

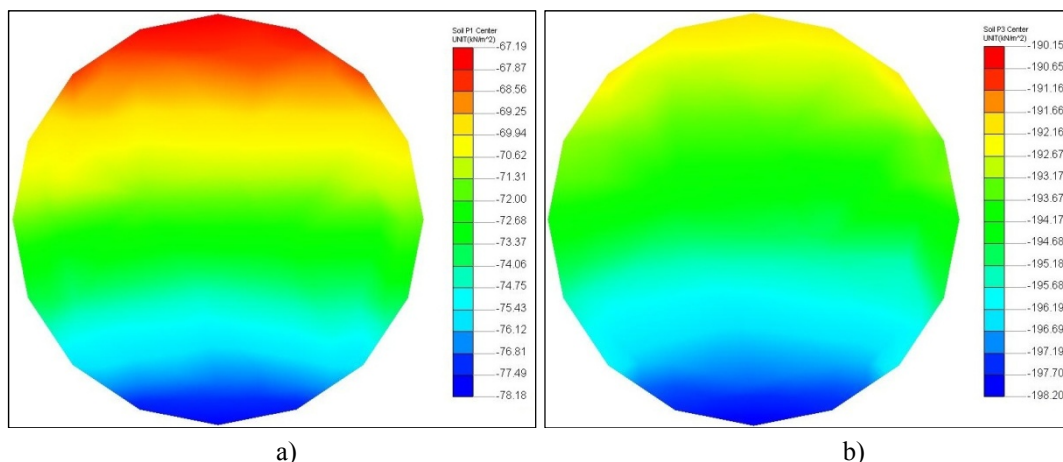
Modelový výpočet zahrnoval stanovení primárního napětíového stavu a následné zabudování injektovaného tělesa (variantně v poloze horizontální resp. vertikální). Modelově byly vyhodnoceny celkové posuny a hlavní napětí P1 a P3 v injektovaném tělese a bylo provedeno grafické porovnání výsledků jednotlivých geometrických i materiálových variant.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

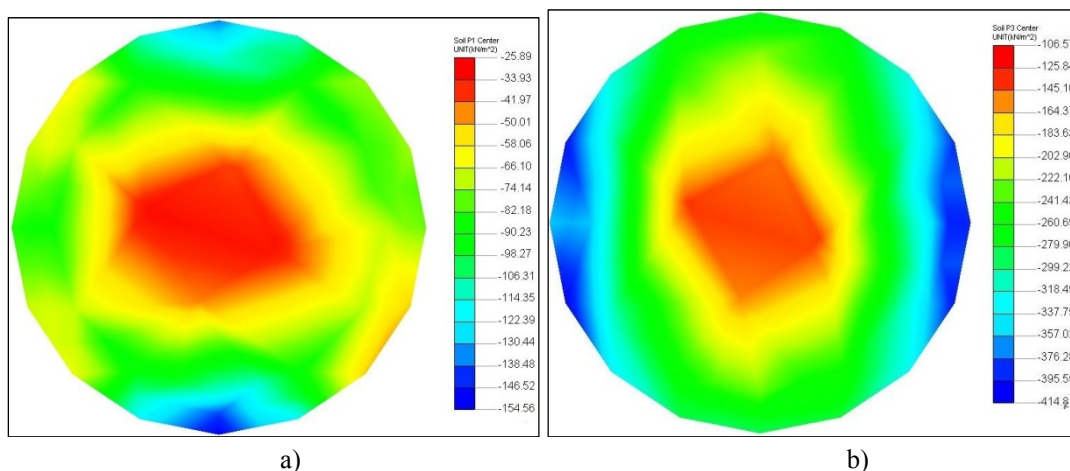
Grafické výsledky modelování jsou uvedeny na obr. 4 až 7. Rozdíly v redistribuci hlavních napětí a celkových posunů mezi tělesem s homogenním rozložením polyuretanového pojiva a nehomogenním tělesem při obou variantách uložení (horizontální a vertikální) ukazují grafy na obr. 8 a 9. Poměr maximálních hodnot hlavních napětí P1 a P3 ve vnější vrstvě (plášti) a vnitřní vrstvě (jádru) tělesa z nehomogenního geokompozitu přináší tab. 2.

Tab. 2: Poměr maximálních hodnot hlavních napětí P1 a P3 ve vnější vrstvě (plášti) a vnitřní vrstvě (jádru) tělesa nehomogenního geokompozitu s materiálovými charakteristikami dle tab. 1

Napětí	Orientace injektovaného tělesa	Poměr mezi hodnotami ve vnější vrstvě (plášti) a vnitřní vrstvě (jádru) tělesa
max. hlavní napětí P1	horizontální	2,46
	vertikální	2,68
max. hlavní napětí P3	horizontální	2,56
	vertikální	3,32

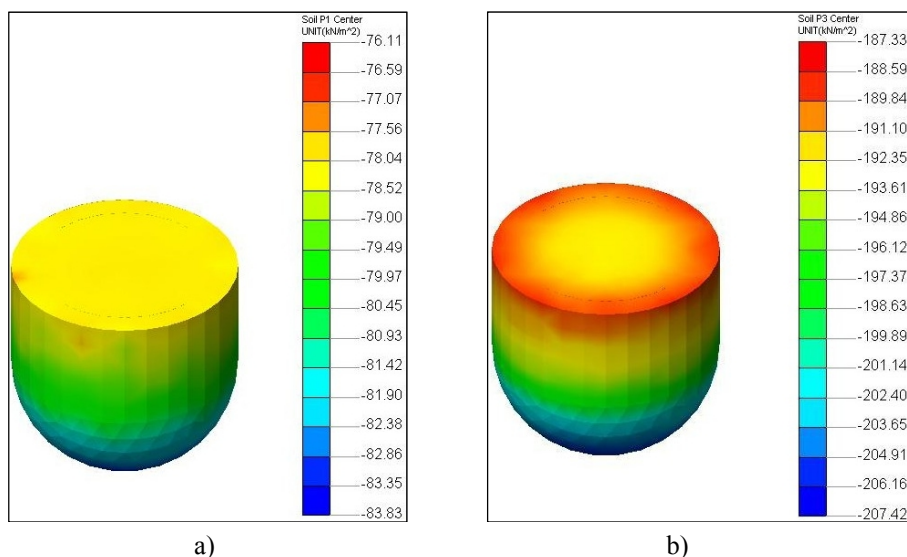


Obr. 4: Těleso homogenního geokompozitu - horizontální uložení: a) hlavní napětí P1, b) hlavní napětí P3

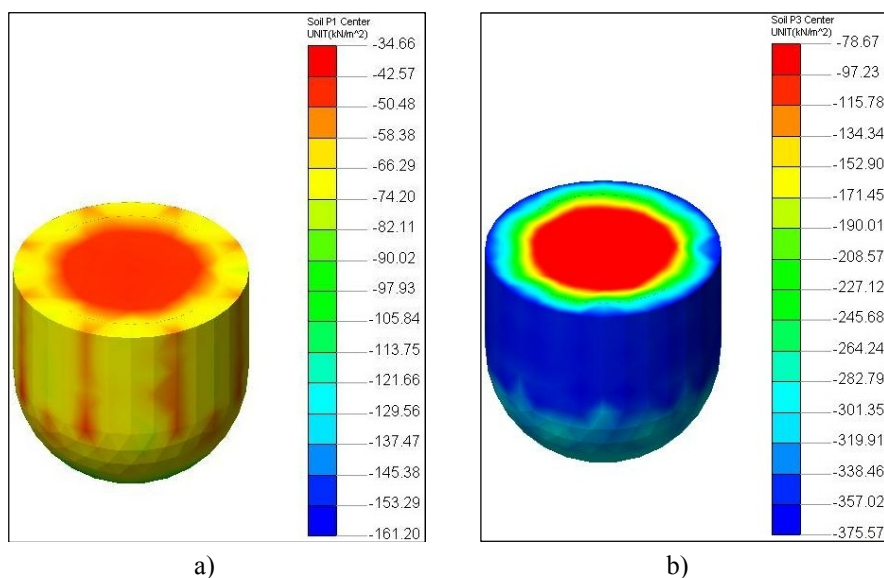


Obr. 5: Těleso nehomogenního geokompozitu s tvrdlivým jádrem - horizontální uložení: a) hlavní napětí P1, b) hlavní napětí P3

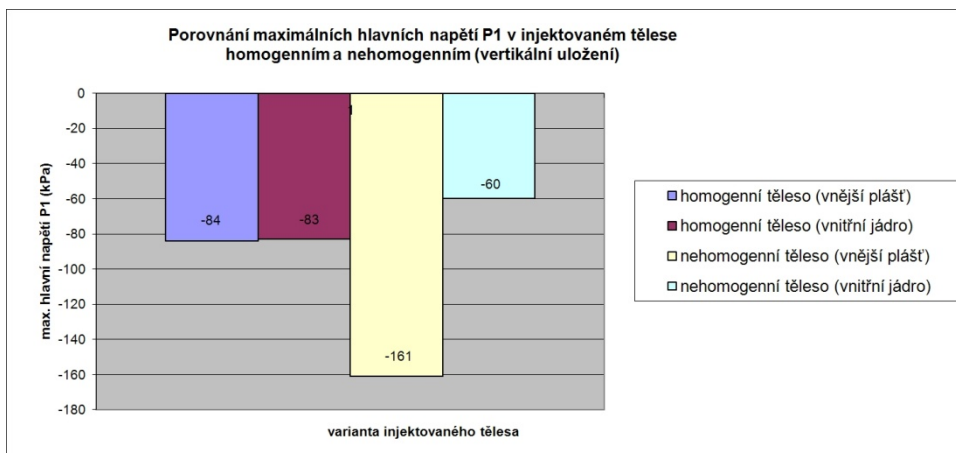
Z grafů na obr. 8 a 9 je zřejmý rozdíl v distribuci hlavních napětí P1 a P3 u tělesa z nehomogenního geokompozitu s pevným pláštěm a tvárlivým jádrem, a to pro obě varianty uložení. Poměr mezi hodnotami hlavních napětí v plášti a jádře (tab. 2) je pro napětí P1 2,46 (horizontální uložení) a 2,68 (vertikální uložení). Pro napětí P3 je tento poměr 2,56 (horizontální uložení) a 3,32 (vertikální uložení). Poměr hodnot hlavních napětí v tělese homogenního geokompozitu bez tvárlivého jádra je blízký 1. Tyto rozdíly jsou vyvolány přerozdělením napětí mezi tužším pláštěm a tvárlivým jádrem geokompozitního tělesa. Míra přerozdělení bude závislá na mocnosti pevnějšího pláště tělesa a rozdílu v hodnotách pevnostních a přetvárných parametrů. Rozdíly mezi oběma typy stavby geokompozitu jsou tedy významné z hlediska rozdělení hlavních napětí, přičemž absolutní hodnoty posunů z deformací lze považovat za nevýznamné.



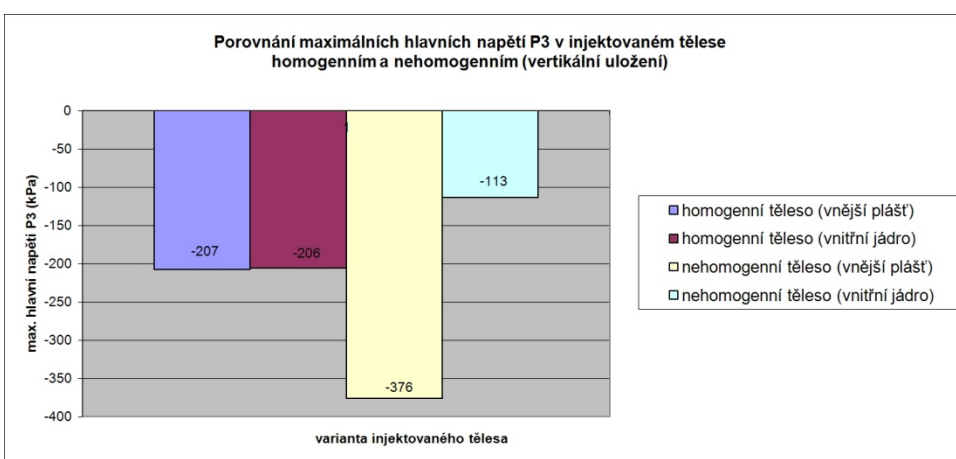
Obr. 6: Těleso homogenního geokompozitu - vertikální uložení: a) hlavní napětí P1, b) hlavní napětí P3



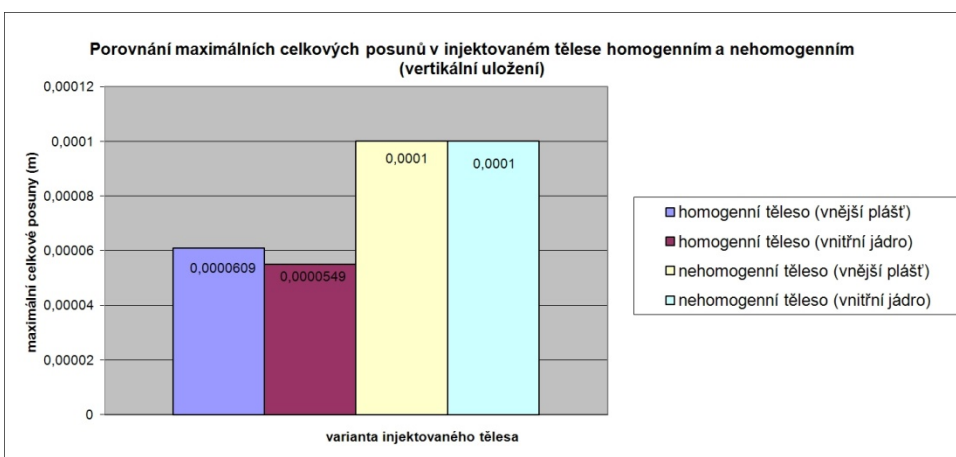
Obr. 7: Těleso nehomogenního geokompozitu s tvárlivým jádrem - vertikální uložení: a) hlavní napětí P1, b) hlavní napětí P3



a)

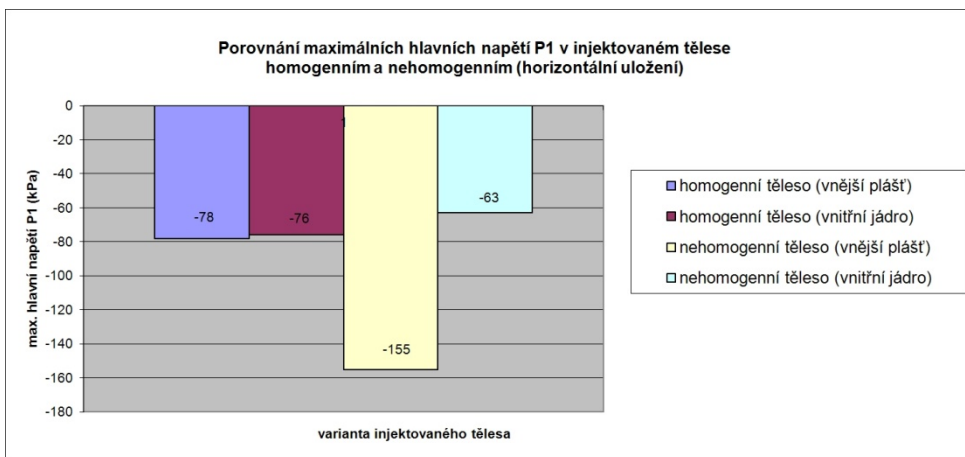


b)

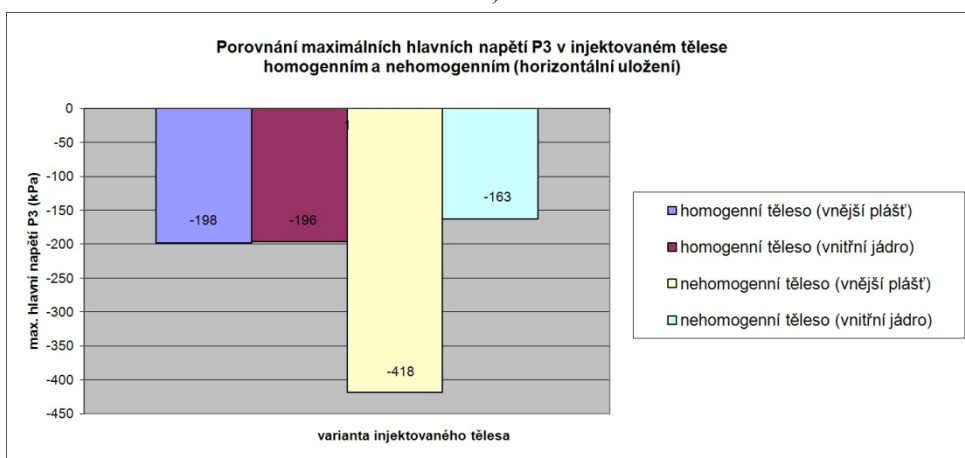


c)

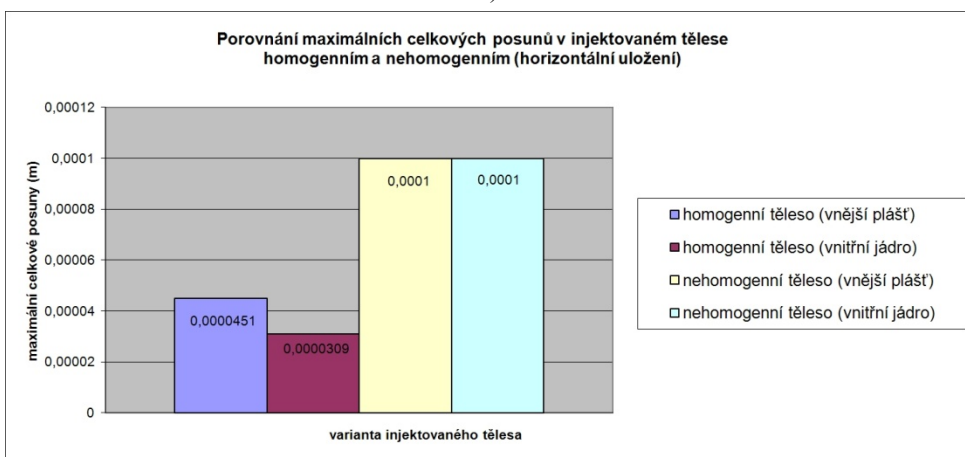
Obr. 8: Srovnání maximálních hlavních napětí P1 (a) a P3 (b) a maximálních celkových posunů (c) u injektovaného tělesa homogenního a nehomogenního s tvrdým jádrem. Je srovnávána vnější a vnitřní zóna tělesa. Vertikální uložení tělesa.



a)



b)



c)

Obr. 9: Srovnání maximálních hlavních napětí P1 (a) a P3 (b) a maximálních celkových posunů (c) u injektovaného tělesa homogenního a nehomogenního s tvárným jádrem. Je srovnávána vnější a vnitřní zóna tělesa. Horizontální uložení tělesa.

5 ZÁVĚR

V praxi se při polyuretanové injektáži písčitých zemin obvykle předpokládá sice zonální, ale relativně homogenní stavba vzniklého injektážního tělesa. Provedené analýzy však ukázaly na strukturní anomálii, která se při injektáži může objevovat a která vede ke kontrastnímu rozložení napětí ve vytvořeném kompozitu. Přestože pro dané modelové podmínky je testované strukturně anomální těleso stabilní, nelze vyloučit lokální nestabilitu nebo porušení geotechnické konstrukce zatížené zemním tlakem (ve větších hloubkách) nebo dodatečným přitížením (zejména při injektáži kotevních systémů, u kterých se očekává dlouhodobá funkce). Při interpretaci modelu je nutno také počítat s vyšší heterogenitou stavby a variabilitou pevnostně-přetvárných parametrů v takto anomálních geokompozitech, než byla uvažována v předloženém příspěvku. V praxi to znamená věnovat zvýšenou pozornost analýze vnitřní stavby monolitických těles získaných z pokusných injektáží in situ.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 podporovaného Operačním programem Výzkum a vývoj pro Inovace, financovaného ze strukturálních fondů EU a ze státního rozpočtu ČR a projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0013 Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO.

LITERATURA

- [1] KUTZNER, CH. *Grouting of rock and soil*. Rotterdam : AA Balkema, 1996. 271 pp. ISBN 90 54106344.
- [2] ŠŇUPÁREK, R. & SOUČEK, D. Laboratory testing of chemical grouts. *Tunelling and Underground Space Technology*. 2000, XV. Nr. 2, pp. 175-186.
- [3] KAROL, R. H. *Chemical grouting and soil stabilization*. 3rd ed. New York : M Dekker Inc, 2003. 558 pp. ISBN 0-8247-4065-3.
- [4] ALDORF, J. & VYMAZAL, J. Příspěvek ke studiu pevnostních a přetvárných vlastností písků, zpevněných injektážními hmotami na bázi polyuretanových a akrylátových pryskyřic. In *Aplikace PUR v hornictví a podzemním stavitelství*. Ostrava : VŠB-TU, 1996, pp. 2-32.
- [5] ŠČUČKA, J. *Studium stavby geokompozitů a kompozitních stavebních materiálů typu kamenivo + pojivo metodami zpracování a analýzy obrazu. Docentská habilitační práce*. Ostrava : VŠB-TU, 2008. 199.
- [6] BODI, J., BODI, Z., SCUCKA, J., MARTINEC, P. *Polyurethane Grouting Technologies*. In *Polyurethane*. 1st ed. Rijeka : INTECH, 2012. pp. 307 -336. ISBN 978-953-51-0726-2

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Lumír Míča, Ph.D., Ústav geotechniky, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Doc. RNDr. František Staněk, Ph.D., Institut geologického inženýrství, HGF, VŠB-TU Ostrava.